

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ ПРИГРАНИЧНЫХ СУБЪЕКТОВ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА РФ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОСТРАНСТВЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

М.Ю. Демидионов

Российский государственный педагогический университет имени А.И. Герцена, факультет географии, НИЛ «Рационального природопользования», инж., канд. геогр. наук; e-mail: demidionovforwork@gmail.com

Возобновляемая энергетика является одной из важных тем в современном дискурсе. Однако, несмотря на большое количество недостатков, можно отметить активный рост как доли, так и суммарной выработки электроэнергии с использованием возобновляемых источников (ВИЭ) во многих странах и регионах мира. Российская Федерация не отличается высокими показателями в упомянутой сфере энергетики, особенно если речь идет о ветровых и солнечных электростанциях. В то же время ВИЭ могут стать важным подспорьем в реализации концепции энергетической безопасности РФ. Одним из регионов страны, где вопрос энергетики стоит особенно остро, является Дальний Восток. В особенности стоит отметить нарастающие проблемы с энергодефицитом региона, который может создать как проблемы с внутренним потреблением, так и затронуть экспортную составляющую. Кроме того, на Дальний Восток приходится более 60% выброса загрязняющих веществ с ТЭС от суммарных показателей страны. Вопрос о развитии ВИЭ в парадигме энергетической безопасности поднимается регулярно, к примеру существуют планы по использованию ВИЭ для последующего производства «зеленого» водорода. Одним из документов, отражающих подобные планы, является «Концепция развития водородной энергетики РФ», в которой, в свою очередь, заявлено создание как минимум трех кластеров по производству «зеленого» водорода. Одним из подобных кластеров является Восточный. Учитывая текущую геополитическую обстановку, а также постепенную переориентацию российской торговли на страны Азиатско-Тихоокеанского региона (АТР), именно Восточный кластер может сыграть ключевую роль в формировании энергетической безопасности страны в будущем. В данной статье предпринята попытка расчета потенциала территорий Дальневосточного федерального округа (ДФО) РФ к развитию солнечной энергетики, выраженная в поиске возможных локаций для внедрения соответствующих технологических решений. Основой для вычислений послужил метод анализа иерархий вкупе с использованием комплекса нечеткой и булевой логик. Отобраны необходимые критерии оценки, произведен расчет матрицы попарного сравнения. С использованием инструментария нечеткой логики произведен перевод абсолютных пространственных значений критериев в относительные. Учтены некоторые ограничительные факторы. Произведен статистический анализ с целью выявления административно-территориальных единиц (АТЕ), обладающих наиболее высокими показателями, рассчитанными согласно использованной методике. Произведена оценка площади территории, пригодной для внедрения соответствующих технологий.

Ключевые слова: солнечная энергетика, метод анализа иерархий, пространственное моделирование

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.2.4

ВВЕДЕНИЕ

Солнечная энергетика, наряду с ветровой, является одним из потенциальных флагманов нового энергоперехода [Yang et al., 2024]. По состоянию на 2023 г. некоторые субъекты РФ могут похвастаться относительно неплохими показателями, в частности Оренбургская и Астраханская области, а также Республики Крым, Калмыкия, Бурятия и Алтай [Суслов и др., 2023]. Однако в общемировом масштабе темпы развития страны в данном направлении невелики. Согласно данным Международного агентства по возобновляемым источникам энергии, в 2023 г. РФ занимала 37-е место в мире по установленной мощности фотоэлектрических систем (PV)

с показателем 6179 МВт [АРВЭ, 2024]. При этом, возлагать всю ответственность на климатические особенности территории невозможно, на что указывает положение в данном рейтинге некоторых стран со схожими физико-географическими условиями: Швеция (3488 МВт), Дания (3529 МВт), Канада (5757 МВт), Нидерланды (23904 МВт).

Ключевой причиной относительно низких показателей энергетики, основанной на возобновляемых источниках (ВИЭ), заключается в больших объемах традиционных энергоресурсов [Суслов и др., 2023]. Данное утверждение характерно не только для России, но и для многих других стран, имеющих высокие показатели добычи углеводородов. К при-

меру, установленная мощность СЭС (солнечных электростанций) в Саудовской Аравии составляет 2235 МВт, при среднем приходе суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность (GHI) – 2266 КВтч/м² в год; в Катаре – 805 МВт, GHI – 1792 КВтч/м² в год; в Алжире – 425 МВт, GHI – 1868 КВтч/м² в год. Для России следует отметить еще два дополнительных фактора, оказывающих прямое влияние на текущую ситуацию с развитием ВИЭ, а именно поздний старт развития отрасли и прямую зависимость экономики от экспорта углеводородов в конце XX – начале XXI в. Если рассмотреть ретроспективу развития ВИЭ, то окажется, что большая часть текущих мировых лидеров в ветровой и солнечной энергетике начали свой путь к лидирующим позициям именно на рубеже веков. В тот период экономика России, несмотря на обширную территорию, обладающую внушительным потенциалом к развитию различных типов ВИЭ, не могла позволить развитие дорогостоящих технологий, что в том числе привело к существующему на данный момент отставанию от мировых лидеров в этой сфере.

Текущая стратегия с упором на углеводороды отвечает существующим потребностям энергетической безопасности, а именно позволяет бесперебойно обеспечивать энергией собственное население, а также занимать необходимую долю мирового рынка. Однако наметившийся энергопереход от традиционных источников энергии к возобновляемым диктует и новые требования к использованию ресурсов для обеспечения энергетической безопасности. В подобном контексте интересны исследования, касающиеся региональной оценки потенциала территории к использованию различных ВИЭ.

Данная тема активно развивается в научной литературе в последнее десятилетие. Из зарубежных работ можно отметить исследование по солнечной энергетике Бангладеш [Islam et al., 2024]. Авторы подчеркивают высокую пригодность территории исследования к развитию отрасли, выделяя южные и юго-восточные территории. Важно отметить, что авторами использован набор стандартных в случае с похожими исследованиями критериев (приход солнечной радиации; температура воздуха; уклон поверхности; экспозиция склона; расстояние до населенных пунктов, дорог, ЛЭП). В то же время такой критерий, как высота над уровнем моря, применяемый в подобных исследованиях, не был использован, что обуславливалось равнинным рельефом, характерным для большей части страны. Однако данная точка зрения не в полной мере верна, что отчасти подтверждается в чуть более раннем исследовании той же территории [Aghaloo et al., 2023], в котором подобный критерий фигурирует. Други-

ми примерами использования высоты над уровнем моря в расчетах являются работы [Ruiz et al., 2020] для территории Индонезии и [Zoghi et al., 2017] для провинции Эсфахан, Иран. Последняя территория рассматривается и в работе [Barzehkar et al., 2017], более того в ней производится оценка не только локаций для возможного размещения СЭС, но и ВЭС. С позиции выбора местоположения для установки ВЭС следует отметить исследование [Солиман и др., 2022], где подробно описан математический аппарат для проведения подобных исследований, особенно с позиции применения различных функций нечеткой логики. Отдельно хотелось бы отметить исследование [Amrani et al., 2024], в котором произведен выбор наиболее оптимальных локаций для внедрения солнечной энергетике в Марокко, при этом в данной работе присутствуют две весьма интересные детали. Во-первых, анализ производится как для PV-панелей, так и для систем концентрирующего типа (CSP). Во-вторых, в отличие от ряда вышеупомянутых работ, в этом исследовании производится разделение критерия «расстояние до дорог», на «расстояние до автомобильных дорог» и «расстояние до железных дорог», что можно считать более правильным в связи с меньшей стоимостью доставки грузов по железным дорогам, если речь идет о больших расстояниях. С позиции рассмотрения ограничительных критериев, т. е. тех, которые характеризуют территории, где хозяйственная деятельность нежелательна, выделяется работа [Rios, Duarte, 2021], посвященная солнечной энергетике Перу. В упомянутом исследовании выделено 33 ограничительных критерия, среди которых есть характерные только для стран с особым рельефом и климатом, к примеру ледники и ледниковые лагуны. В результате около 70% территории исследования оказались непригодными, в основном из-за особенностей высокогорья.

Из отечественных исследований стоит выделить работы по оценке потенциала Республики Крым [Горбунова, 2019], Мурманской области [Lazarev, Kuznetsov, 2024], Забайкальского края [Носкова, 2018], о. Сахалин [Демидионов, 2023]. Отдельно необходимо отметить активную деятельность НИИ возобновляемых источников энергии МГУ имени М.В. Ломоносова.

Однако, несмотря на солидную выборку работ по оценке потенциала гелиоэнергетики для территории РФ, комплексных исследований, затрагивающих ДФО РФ, насчитывается не так много, а тех, в которых вышеупомянутые территории рассматривались бы с учетом как физико-географических, так и экономико-географических факторов, еще меньше. Из исследований, затрагивающих вопрос использования солнечной энергетике в

ДФО, необходимо выделить работу по анализу некоторых факторов при использовании гелиопотенциала Республики Саха [Иванова и др., 2018], исследование по расчету количества солнечной радиации для юга Дальнего Востока [Аббасов, Гричковская, 2009], исследование по оценке возможности использования солнечной энергии в Амурской области [Мирошниченко, 2014].

В текущем исследовании было принято решение оценить потенциал субъектов Федерации в составе ДФО (Амурской и Сахалинской областей, Еврейской АО, Приморского и Хабаровского краев) к развитию солнечной энергетики. Само понятие «потенциал» оставляет достаточно широкую возможность его трактовки. В текущем исследовании под потенциалом подразумевается коэффициент, при расчете которого используются значения физико-географических (приход солнечной радиации, высота над уровнем моря и пр.) и экономико-географических (расстояние от точки пространства до объектов инфраструктуры) параметров территории.

Значимость подобных исследований в текущей энергетической парадигме региона диктуется существующими проблемами с потенциальным энергодефицитом Дальнего Востока. Согласно данным Минэнерго, к 2030 г. в регионе может сформироваться крупный дефицит электроэнергии, в том числе из-за высокого темпа роста ее потребления [Большов, 2023]. Безусловно, солнечная энергетика не покроет высоких потребностей региона, однако внести определенный вклад, хоть и небольшой, вполне сможет. Не следует считать, что энергодефицит региона повлияет только на внутренние проблемы. За первую половину 2024 г. экспорт электроэнергии в Китай, а конкретно в провинцию Хэйлунцзян, сократился на 76%, в том числе по причине недостаточного производства [Корочкина, 2024]. Стоит также отметить, что доля восточных регионов в общероссийской структуре выбросов загрязняющих веществ от ТЭС составляет 63% [Санеев и др., 2023], поэтому ввод большей доли ВИЭ в энергосистему региона может положительно сказаться и на экологической обстановке.

Однако по состоянию на 2024 г. исследуемая территория не обладает внушительным количеством установленной мощности СЭС, даже на фоне некоторых других регионов страны. Согласно данным ГИС ВИЭ, подавляющее большинство солнечных станций в пяти исследуемых регионах представляет собой небольшие установки для обеспечения электроэнергией навигационных знаков, маяков, систем придорожного освещения [ГИС ВИЭ, 2024]. Хотя количество приходящей солнечной радиации сравнимо с Забайкальским краем, где функционирует несколько крупных СЭС.

Практически не затронута и тема пространственного моделирования потенциала солнечной энергетики ДФО в совокупности с производством «зеленого» водорода. Последний пункт особенно важен в связи с планами по созданию Восточного кластера по производству «зеленого» водорода, упомянутого в «Концепции развития водородной энергетики РФ» [Распоряжение..., 2021]. Хотя, согласно планам Минпромторга РФ, в Забайкальском крае планируется строительство предприятия по производству «зеленого» водорода с использованием электроэнергии, полученной на СЭС. Вследствие чего возникает вопрос, почему подобных проектов нет, к примеру, для Приморского края, обладающего выходом к морю, что критически важно для торговли водородом. В качестве еще одного фактора выбора территории исследования явилось ее приграничное и/или приморское положение, позволяющее наладить возможный экспорт энергоресурсов в страны АТР, что в том числе отвечает потребностям энергетической безопасности страны, в особенности тех пунктов, которые касаются рыночных отношений [Доктрина..., 2019].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В современном научном дискурсе при проведении подобных исследований относительно практически всех типов ВИЭ зачастую используются методы, входящие в группу мультикритериального анализа. Среди наиболее часто используемых можно выделить следующие: метод выбора порядка предпочтения по сходству с идеальным решением (TOPSIS) [Hooshangi et al., 2023], метод «лучшего-худшего» (BWM) [Aghaloo et al., 2023], метод анализа иерархий (АНП) [Rios, Duarte, 2021; Islam et al., 2024].

В качестве основы для проведения расчетов в данном исследовании был использован метод анализа иерархий с применением нечеткой и булевой логики для унификации абсолютных значений критериев, а также введения зон ограничения хозяйственной деятельности. Данное сочетание позволяет более комплексно оценить каждую точку пространства, учитывая как значимость отдельных критериев, так и их пространственную дифференциацию.

Сам метод анализа иерархий позволяет вычислить вес критериев, т. е. степень их влияния на искомый потенциал. Для расчета весов экспертам в соответствующей области предлагается заполнить матрицы попарного сравнения критериев на основе шкалы относительной важности. Затем полученные матрицы усредняют для получения итоговой. Вопрос о том, каким методом необходимо производить усреднение, является дискуссионным. В текущем исследовании было принято решение использовать среднее геометрическое, так как оно позволяет сохранить в действии правило согласованности матрицы.

На основе полученной матрицы вычисляются веса отдельных критериев, однако возникает и необходимость проведения теста на согласованность матрицы для вычленения возможной чрезмерной дифференциации в мнении экспертов. Данный метод заключается в подсчете отношения согласованности матрицы – CR. Значение CR не должно превышать 0,1, в противном случае необходимо пересматривать составленные экспертами матрицы

$$CR = \frac{\left(\frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \right)}{RI},$$

(1)

где $\lambda_{\max}$ – наибольшее собственное значение матрицы, n – размерность матрицы, RI – основанное на экспериментальных данных среднее значение индекса однородности.

Следующим этапом после получения весов критериев является их унификация. Необходимость в ней возникает в связи с различной степенью воздействия тех или иных факторов в зависимости от расстояния до объектов (в случае с инфраструктурой) и абсолютных значений (в случае, к приме-

ру, с приходящей солнечной радиацией). В рамках унификации физико-географических и экономико-географических критериев была использована нечеткая логика. Преимуществом использования данной методики является возможность учитывать нелинейное изменение влияния в пространстве того или иного критерия на итоговый результат. Для унификации абсолютных значений критериев были использованы четыре функции: линейная возрастающая (I), линейная убывающая (II), линейная убывающая 2-го типа (III), трапециевидная (IV). К каждому критерию были подобраны соответствующие параметры в зависимости от природоохранных требований и экономической эффективности.

Отбор критериев происходил в том числе на основе анализа предыдущих исследований на схожую тематику. Как отмечалось ранее, набор основных критериев практически не отличается от исследования к исследованию, а региональная специфика проявляется уже при унификации. Исследования, на основе которых производился отбор критериев, а также то, какие из выбранных критериев применяются в данных работах, приведены в таблице.

Таблица

Использование выбранных в текущем исследовании критериев в различных работах по выбору оптимальных локаций для расположения СЭС (номера критериев даны согласно текущему исследованию)

Статья	Критерий								
	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9
[Al Garni, Awasthi, 2017]	+	+	+	+	+	+	+		
[Aghaloo et al., 2023]	+		+	+	+	+	+	+	+
[Amrani et al., 2024]	+		+		+	+	+	+	
[Barzehkar et al., 2017]	+				+	+	+		
[Hooshangi et al., 2023]		+	+	+		+			
[Islam, 2024]	+	+	+	+	+	+	+	+	
[Rios, Duarte, 2021]	+		+		+	+	+	+	
[Ruiz et al., 2020]	+	+	+	+	+	+	+	+	+
[Zoghi et al., 2017]	+		+	+	+	+	+	+	+

Важно отметить следующую деталь: фактически все использованные критерии не несут в себе никакой региональной специфики, т. е. используются практически во всех исследованиях в независимости от географического положения, что в том числе подтверждается данными, приведенными в таблице 1. Однако критерий «высота над уровнем моря» (K9) встречается только в трех из девяти приведенных исследованиях. Это объяснимо для территорий с небольшим перепадом высот, однако Дальний Восток как раз обратный пример. По этой

причине подобный критерий необходим в текущем исследовании.

При расчете потенциала исследуемой территории были отобраны критерии, оказывающие наибольшее влияние на локализацию производств. Важно отметить, что в данном исследовании производились расчеты относительно двух типов СЭС – фотоэлектрических панелей (PV) и солнечных систем концентрирующего типа (CSP). Сами критерии для обоих типов ЭС не отличаются, но дифференциация проявляется в параметрах унификации.

К1 – приход солнечной радиации. Данный критерий является основополагающим для расчета потенциала гелиоэнергетики. В случае с вычислениями относительно PV-панелей учитывается суммарная солнечная радиация (GHI), а для CSP-станций – прямая солнечная радиация на нормальную (перпендикулярную) к лучу поверхность (DNI), в связи с конструктивными особенностями станций. При унификации абсолютных значений GHI и DNI была использована линейная возрастающая функция (I). Подобный выбор объясняется тем, что, согласно экспериментальным данным [Vilanova et al., 2020], производительность солнечных электростанций линейно зависит от приходящей солнечной радиации.

В качестве максимальных показателей GHI и DNI, где функция достигает значения «1», принимались наивысшие значения из массива. Несмотря на тот факт, что средние значения прихода солнечной радиации на территории исследования (особенно в ее южной части) выше, чем в среднем по стране, при сравнении с более южными странами и регионами, относительно которых производились аналогичные расчеты, территории ДФО РФ уступают по обоим показателям. В качестве минимального значения DNI и GHI для расчета потенциала территории к размещению СЭС было принято значение 1000 кВтч/м² в год, согласно [Ruiz et al., 2020].

К2 – температура воздуха. Необходимость учитывать данный параметр вызвана его прямым влиянием на эффективность выработки электроэнергии на СЭС. Согласно экспериментальным данным, максимально близкие к расчетным показатели выработки электроэнергии наблюдаются при температуре воздуха около 25°C. Согласно [Huld, Amillo, 2015], при увеличении температуры выше данного значения наблюдаются потери эффективности выработки электроэнергии около 0,5 относительных процентов на каждый градус температуры. Базируясь на этой динамике, в основу унификации значений данного критерия была положена линейная убывающая функция (II): параметр a – минимальное значение из массива, параметр b – максимальное значение. При анализе учитывалось 12 массивов данных по среднемесячной температуре.

К3 – уклон поверхности. Данный критерий несет в себе экзистенциальный характер при планировании постройки СЭС. Во-первых, в случае с солнечными системами концентрирующего типа допустимый уклон поверхности соответствует 2,1° [Amrani et al., 2024], что будет отражено в критериях строгого ограничения соответствующей деятельности. Во-вторых, больший уклон поверхности ведет к издержкам при строительстве станции. На основании вышеупомянутого факта и параметров

подобных исследований для унификации была использована линейная убывающая функция с параметрами $a - 4^\circ$ и $b - 10^\circ$.

К4 – экспозиция склона. Важно отметить, что, учитывая крайне низкий допустимый уклон поверхности для CSP-станций, в случае с проведением расчетов для потенциала их размещения необходимость учитывать экспозицию практически отсутствует. Следовательно, при унификации данного параметра относительно CSP, всем точкам пространства было присвоено значение «1».

В случае с фотоэлектрическими панелями в Северном полушарии наиболее удачной экспозицией, согласно [Al Garni, Awasthi, 2017], является южная. Для того чтобы учесть данную особенность, при унификации была использована трапециевидная функция (IV) со следующими параметрами: $a - 0$, $b - 135$, $c - 225$, $d - 360^\circ$.

Расстояние до: **К5 – крупных населенных пунктов, К6 – автомобильных дорог, К7 – ЛЭП, К8 – железных дорог.** Данная группа критериев относится к экономико-географическим и объединена общим трендом: близость к соответствующей инфраструктуре положительно влияет на снижение стоимости постройки и обслуживания электростанций, в том числе и за счет упрощения логистики. В случае с расстоянием до крупных населенных пунктов положительным фактором является как близость к потребителю, так и к квалифицированным рабочим кадрам. Под крупными населенными пунктами понимались поселения, которые, согласно ГК РФ, относятся к категории «крупные сельские поселения» и больше (более 5000 человек). Безусловно, такие населенные пункты имеют источники энергоснабжения, но снижение нагрузки на ТЭС, к примеру, можно частично компенсировать солнечной энергетикой.

В то же время необходимо учитывать и ограничения на строительство крупных комплексов солнечных панелей на некоторой дистанции от объектов инфраструктуры. Для соблюдения всех вышеупомянутых пунктов при унификации абсолютных показателей критериев расстояния до населенных пунктов и дорог была использована линейная убывающая функция второго типа (III). В качестве минимально допустимого расстояния была выбрана отметка в 500 м (параметр a). Параметром b для автомобильных дорог соответствует значение в 30 000 м, а для железных – 25 000 м, в связи с чуть более высокой стоимостью строительства километра железнодорожного полотна.

В качестве еще одного критерия было выбрано расстояние до ЛЭП. Можно предположить, что в данном случае более уместно было бы использование расстояния до подстанции, однако здесь важно

учесть экономический аспект. Стоимость строительства относительно крупной подстанции, к примеру мощностью 16 000 кВт, колеблется от 10 до 15 млн руб. [Строительное оборудование, 2024], в то время как километр ЛЭП (в среднем по рынку) обойдется в 500 тыс. руб. Учитывая большие расстояния, характерные для региона исследования, в подавляющем большинстве случаев дешевле построить подстанцию рядом с ЛЭП, чем тянуть ЛЭП до находящейся в отдалении подстанции.

Вопрос выбора функции унификации для критерия расстояния до ЛЭП является дискуссионным. В ряде работ используется именно линейная убывающая функция второго типа. Однако более интересный подход предложен в исследовании [Zoghi et al., 2017], где была использована сигмоидальная симметричная функция. Подобный выбор обоснован тем, что стоимость километра постройки ЛЭП ниже, чем, к примеру, автомобильной или железной дороги, из чего следует, что на определенном промежутке можно пренебречь изменениями в относительных значениях при изменении функции. В текущем исследовании была применена схожая методика, выраженная в применении трапецевидной функции для унификации расстояния до ЛЭП. Точкам функции были присвоены следующие значения: $a - 500$, $b - 1000$, $c - 15\,000$, $d - 60\,000$.

К9 – высота над уровнем моря. Высота над уровнем моря оказывает существенное влияние сразу на ряд параметров, связанных с деятельностью СЭС. С увеличением высоты возрастает скорость ветра и понижается температура воздуха, что оказывает положительный эффект на охлаждение панелей. Также происходит и уменьшение плотности атмосферы, что ведет к увеличению прихода солнечной радиации. Вместе с тем стоит отметить, что большая высота ведет к повышению нормированной стоимости производства электроэнергии (LCOE) на СЭС в связи с подорожанием как строительства, так и обслуживания станции. Чтобы учесть положительные и отрицательные стороны, было принято решение использовать трапецевидную функцию (V), опираясь на ранее упомянутое исследование М. Зоги [Zoghi et al., 2017]. С опорой на региональные особенности рельефа были подобраны следующие параметры: a – минимальное значение высоты над уровнем моря (м), $b - 1000$ м, $c - 2000$ м, $d - 3000$ м.

Данные по количеству приходящего солнечного излучения (разрешение 250 м на пиксель) получены при помощи портала Global Solar Atlas [Global Solar Atlas, 2024]. Для анализа критериев, связанных с рельефом поверхности, в текущем исследовании используется модель рельефа SRTM с разрешением

30 м на пиксель. Данные по температуре были рассчитаны согласно значениям, полученным со 100 метеостанций, расположенных на территории исследования [Гидрометцентр России, 2023]. Данные по экономико-географическим критериям на ноябрь 2023 г. получены на портале NextGIS [NextGIS, 2023] и впоследствии переработаны (исключены изолированные дороги).

Следующим этапом после унифицирования значений критериев для объединения весов критериев и их относительных значений был применен метод взвешенной линейной комбинации

$$A_i^{WLC-score} = \sum_{i=1}^n x_i w_i, \quad (2)$$

где $A_i^{WLC-score}$ – искомый коэффициент потенциала, x_i – унифицированное значение критерия, w_i – вес критерия.

Для исключения из полученного массива непригодных для использования в рамках строительства СЭС территорий применялась булева логика, где точкам в пространстве были присвоены значения 0 (размещение электростанции запрещено) и 1 (размещение электростанции возможно). Для получения итогового искомого массива данных коэффициент по потенциалу производится умножение полученного ранее раstra потенциала на растр с критериями ограничения. Фактически итоговый массив представляет собой результат взвешенной линейной комбинации всех используемых критериев, из которого вычленены территории, где строительство СЭС нежелательно.

В качестве территорий, где соответствующая деятельность нежелательна, были выбраны населенные пункты, военные объекты, взлетно-посадочные полосы, ООПТ (буфер – 1000 м), водные объекты (буфер – 200 м), заболоченные территории, крупные лесные массивы, территории с различными характеристиками землепользования (сельскохозяйственные территории и проч.). Отдельно введен критерий расстояний от крупнейших рек региона – Амур, Зeya, Бурея и Уссури (буфер 20 000 м) – в связи с риском затопления территорий. Соответствующий буфер равен максимальному значению, обнаруженному в научной литературе, указанному в учебном пособии [Соколов, 1952]. Алгоритм примененного метода отражен на рис. 1.

Для выделения АТЕ, имеющих наибольший потенциал для внедрения соответствующих технологий, был проведен статистический анализ полученных данных. Для каждой АТЕ, входящей в территорию исследования, были рассчитаны среднее арифметическое и 90-й перцентиль по значениям итогового массива данных. Последний играет основополагающую роль при оценке потенциала,

так как при проведении подобных изысканий интерес вызывают наиболее энергоэффективные участки. Применение такого показателя, как 90-й процен-

тиль, позволяет вычлнить, выше какого значения потенциала расположены 10% наиболее эффективных территорий.

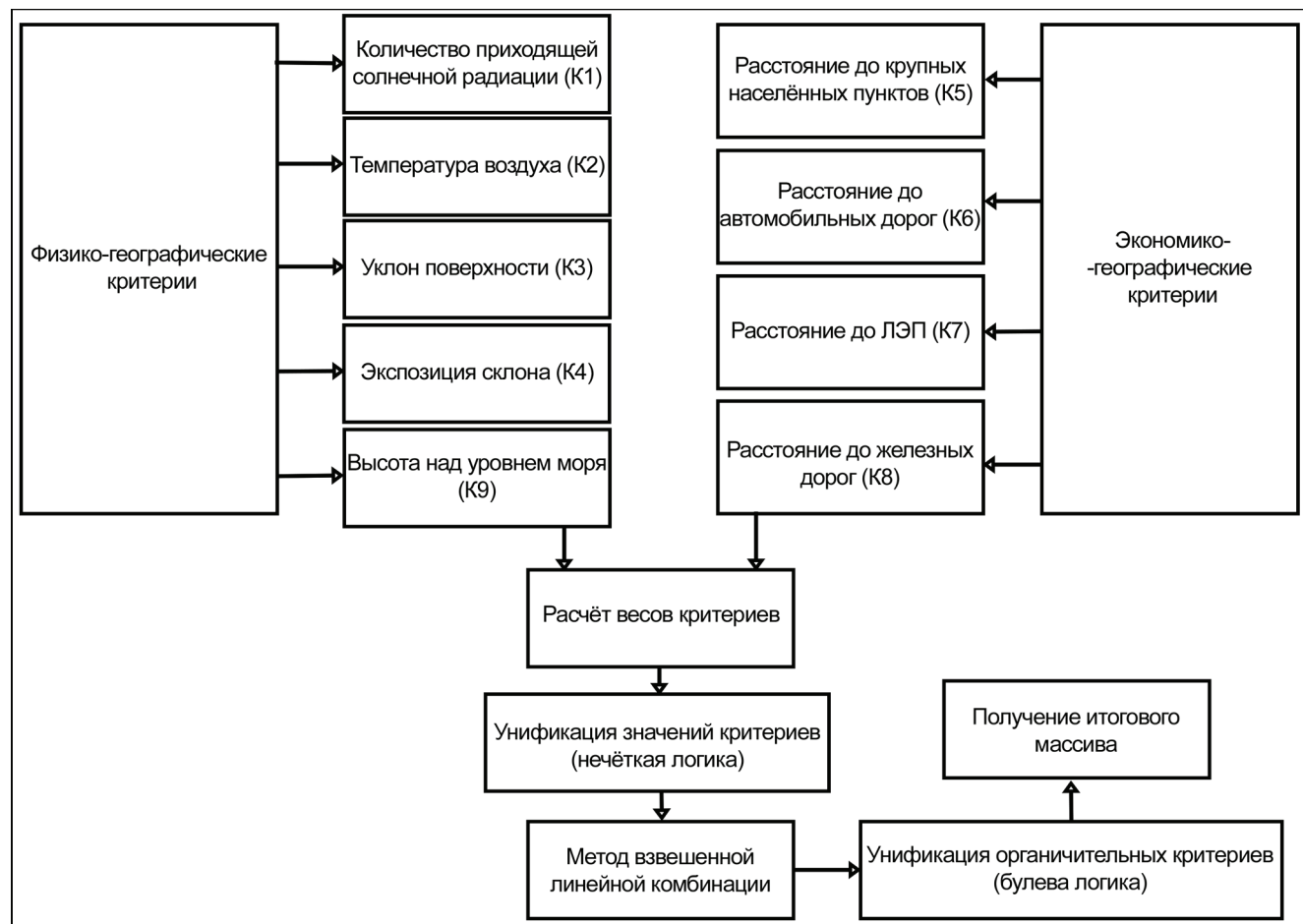


Рис. 1. Схема-алгоритм использованной методики. *Источник:* составлено автором

Fig. 1. Schematic diagram of the employed methodology. *Source:* compiled by the author

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При составлении матриц попарного сравнения были использованы матрицы, содержащиеся в исследованиях [Barzehkar et al., 2017; Islam et al., 2024; Rios, Duarte, 2021], также дополнительные матрицы были сформированы авторами исследования. Итоговая матрица и веса критериев представлена на рис. 2.

CR составил 0,068, из чего следует, что матрица прошла тест на согласованность. Учитывая строгую привязку любых объектов возобновляемой энергетики к соответствующему ВИЭ, согласно мнению всех экспертов, именно количество приходящего солнечного излучения является основополагающим фактором. Как следствие, вес данного критерия составил 0,383, что в 3 раза выше следующего за ним критерия «расстояние до ЛЭП» – 0,133. Другой физико-географический

критерий – «температура воздуха», также получил достаточно значимый вес – 0,104. В свою очередь критерий «высота над уровнем моря», напротив, имеет наименьший показатель из всех – 0,022. По итогам расчетов были сформированы два массива данных по потенциалу территории к размещению СЭС двух типов – PV (рис. 3) и CSP (рис. 4) с разрешением 250 м на пиксель.

Территории с наиболее высоким потенциалом в случае применения фотоэлектрических станций расположены вдоль Транссибирской магистрали, на что могло повлиять сразу несколько факторов. Во-первых, именно там находится одна из зон с наиболее высокими значениями GHI. Во-вторых, наличие более развитого инфраструктурного комплекса вдоль Транссиба внесло свой вклад в раздел экономико-географических критериев. С позиции высокого потенциала необходимо выделить юг и юго-

восток Амурской области, восток Еврейской АО и южные территории Приморского края. В случае с Сахалинской областью можно выделить полосу, протянувшуюся от юга Поронайского ГО до севера Тымовского района, однако в основном потенциал области не столь велик.

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	Вес
K1	1	4	5,422	5,769	6,804	6,192	4,527	6,192	9	0,383
K2	0,25	1	0,577	1,225	6	1,291	1	1,291	3	0,104
K3	0,184	1,732	1	1,494	0,941	0,946	0,731	0,946	7	0,093
K4	0,174	0,812	0,67	1	3,464	1,145	0,55	1,145	4	0,08
K5	0,15	1,667	1,063	0,289	1	0,794	0,362	0,794	2 ≈	0,046
K6	0,162	0,775	1,057	0,874	1,26	1	0,325	1	5	0,069
K7	0,221	1	1,368	1,817	2,759	3,08	1	3,08	6	0,133
K8	0,162	0,775	1,057	0,874	1,26	1	0,324	1	5	0,069
K9	0,111	0,333	0,143	0,25	0,5	0,2	0,167	0,2	1	0,022

Рис. 2. Попарная матрица и веса критериев для анализа потенциала территории к развитию гелиоэнергетики.
Источник: составлено автором

Fig. 2. A pairwise matrix and weighting of criteria for assessing the potential of a territory for solar energy development.
Source: compiled by the author

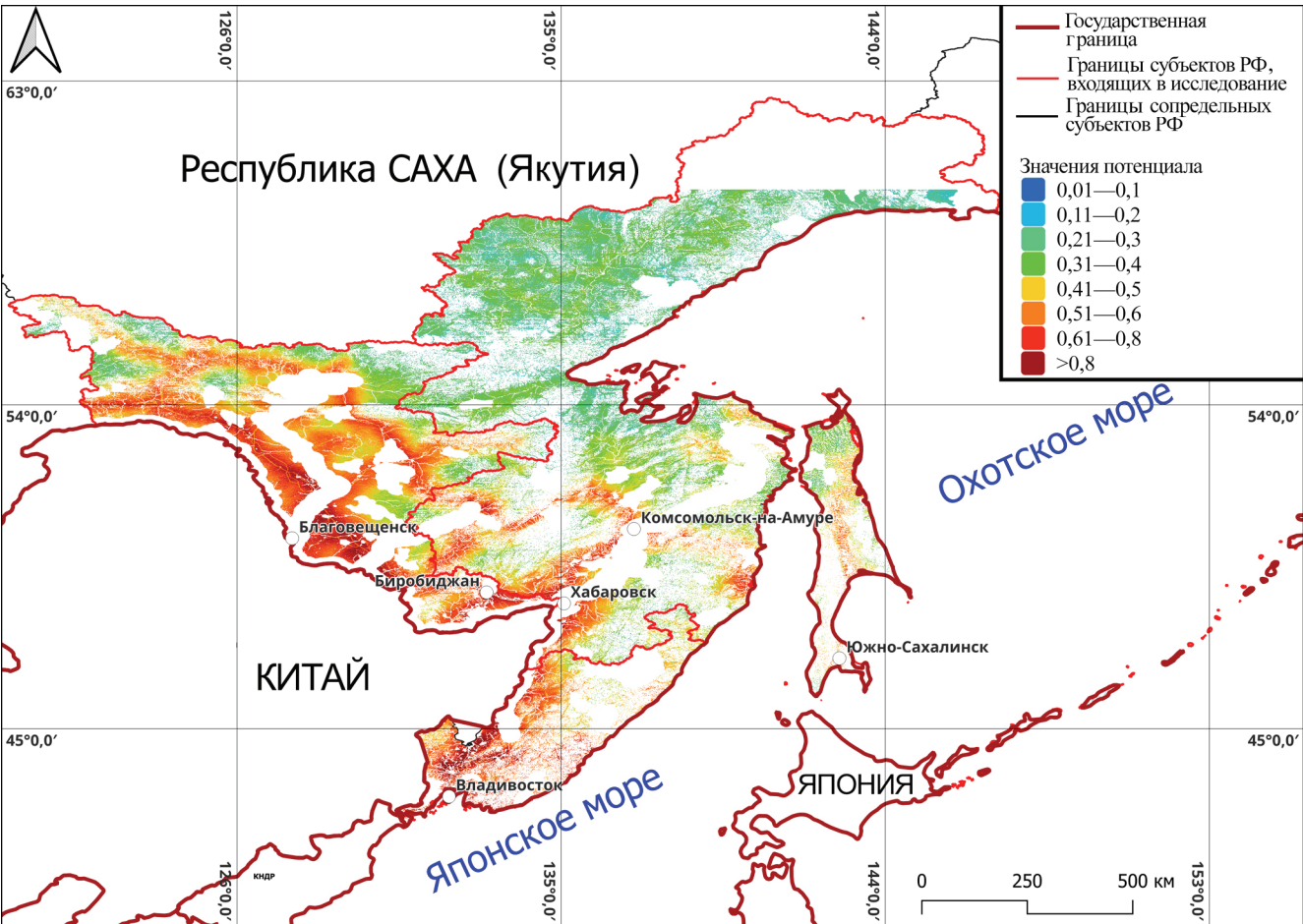


Рис. 3. Потенциал территории к размещению СЭС (PV). Источник: составлено автором

Fig. 3. The potential of the territory for the solar station (PV) placement. Source: compiled by the author

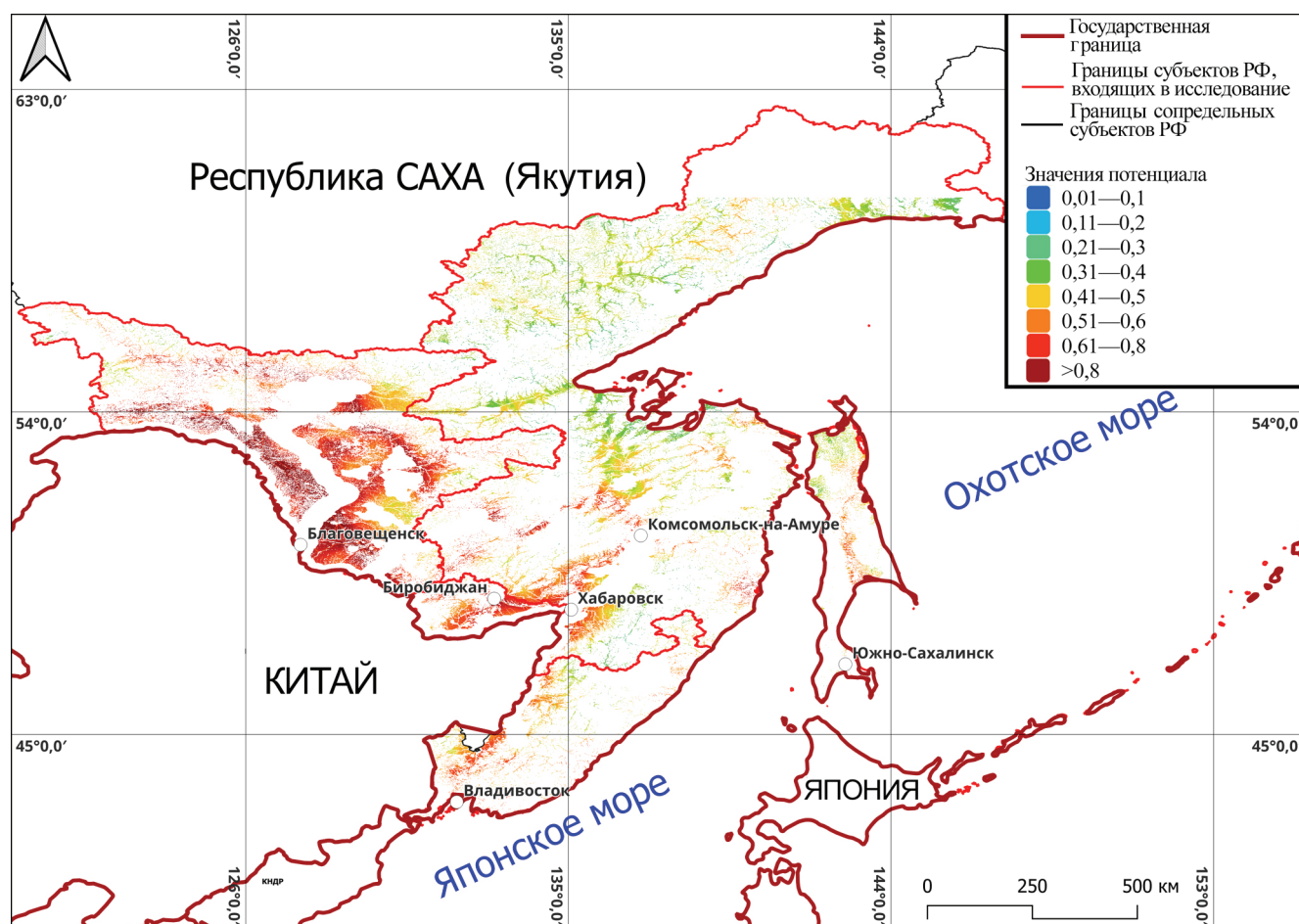


Рис. 4. Потенциал территории к размещению СЭС (CSP). *Источник:* составлено автором

Fig. 4. The potential of the territory for the solar station (CSP) placement. *Source:* compiled by the author

По средним значениям потенциала территории к внедрению энергетики, основанной на использовании PV-панелей, выделяются городские округа Белогорск и Райчихинск (Амурская обл.). Также стоит отметить Черниговский район (Приморский край) и Белогорский МО (Амурская обл.). При этом данные АТЕ обладают не только высоким потенциалом, но и большой площадью территорий, пригодных для строительства PV-станций, что повышает вариативность при выборе места точного размещения электростанции. Говоря о Черниговском районе, необходимо отметить и высокий показатель 90-го процентиля: около 102 км² его площади обладают потенциалом более 0,81. Можно выделить и высокие показатели Спасского района (Приморский край).

Суммируя вышесказанное, отметим, что наиболее энергоэффективные с точки зрения потенциала развития солнечной энергетики и применения PV-панелей территории расположены вдоль Транссибирской магистрали и границы с Китаем, а также на юге Приморского края.

Несмотря на то что для PV- и CSP-станций были приняты единые экономико-географические

критерии и параметры, при сравнении полученных массивов данных по потенциалу исследуемых территорий заметно, что в случае со станциями концентрирующего типа акцент сильно смещен в Амурскую область и частично в Еврейскую АО. На подобную пространственную дифференциацию между двумя типами СЭС повлияло несколько факторов. Во-первых, если некоторые из исследуемых территорий обладали схожими показателями GHI, то значения DNI на юге Амурской области и в Еврейской АО намного выше (приблизительно на 200–300 кВтч/м² в год). Во-вторых, Амурская область обладает более пологим рельефом в отличие от Приморского края, что критически важно в случае с CSP-станциями (допустимое значение уклона для строительства станции составляет 2,1°). Как следствие, подавляющее большинство территории Приморского края с относительно высоким потенциалом сосредоточены в более равнинной юго-западной части субъекта.

На основе статистического анализа для рассчитанного массива данных можно выделить несколько тезисов. С точки зрения средних значений по-

тенциала CSP выделяются городские округа (ГО) Белогорск и Шимановск (Амурская обл.). Но в то же время, несмотря на высокие средние значения потенциала, данные ГО имеют невысокие показатели площади территорий, на которых установка соответствующих электростанций допустима, относительно некоторых других АТЕ. К примеру, в ГО Белогорск подобное значение составляет около 15 км², что не дает возможности говорить о высокой степени вариативности локализации ЭС на территории округа. В свою очередь в ГО Шимановск данный показатель равняется всего 640 м², что в целом не позволяет говорить о высоком потенциале данной территории. Однако помимо городских округов, высокими значениями потенциала обладают и соответствующие муниципальные округа (МО) Белогорский и Шимановский. Отдельно необходимо выделить и некоторые западные АТЕ Амурской области – Сковородинский МО и Магдагачинский район. Последний обладает и высокими значениями 90-го процентиля. Большая часть упомянутых АТЕ расположены либо на приграничных территориях, либо в южной части области. Стоит отметить, что превосходство южных и юго-восточных АТЕ области в вопросе возможного размещения СЭС отмечается, к примеру, в работе Т.А. Мирошниченко [Мирошниченко, 2014]. Также автор отмечает немаловажную деталь, что экономически наиболее эффективно обеспечение электроэнергией, полученной на СЭС, именно удаленных поселений, а не более крупных городов. Данная позиция вполне обоснована, учитывая дороговизну соответствующих технологий, однако постепенное падение LCOE в случае с СЭС повышает экономическую рентабельность предприятия, что позволит расширить географию использования СЭС.

В целом, принимая во внимание показатели 90-го процентиля, помимо ранее отмеченных АТЕ выделяется Свободненский район. При этом, помимо высоких показателей искомого потенциала, в нем можно отметить и внушительное значение площади, которую занимают наиболее энергоемкие территории внутри района (около 263 км²). Также стоит рассмотреть Ванинский и Советско-Гаванский районы, расположенные на территории Хабаровского края. Для них характерны относительно высокие значения 90-го процентиля, но большинство участков с высоким потенциалом располагаются возле г. Советская Гавань. Кроме того, значения прямой солнечной радиации на данной территории относительно высоки (в среднем около 1580 кВтч/м² в год).

Суммируя все вышесказанное, необходимо еще раз подчеркнуть мысль о том, что наиболее эффективные территории с позиции потенциала развития солнечной энергетики с использованием станций

концентрирующего типа расположены в Амурской области. Как и в случае с потенциалом территории к размещению фотоэлектрических станций, Сахалинская область практически не обладает высокими искомыми значениями. В Приморском крае можно выделить Партизанский район и Партизанский ГО, однако в них не наблюдается сгруппированных территорий с высоким потенциалом, а скорее отдельные небольшие участки, что может говорить о возможности строительства локальных станций, однако критично для крупных энергокомплексов.

При проведении подобной оценки, несомненно, должен возникать вопрос экономической эффективности. Сразу же стоит заметить, что, несмотря на постепенное падение LCOE, солнечная энергетика в некоторых ситуациях остается нерентабельной. По данным аналитического агентства Lazard [Lazard, 2024] на 2024 г., LCOE (средний по миру) в случае с PV-панелями составляет 61\$ за МВт·ч – 2-е место по дешевизне после ветроэнергетических установок (50\$ за МВт·ч). При этом угольные ТЭС обладают LCOE в 2 раза дороже, чем PV-панели. Кроме того, можно отметить и серьезную динамику, характерную для фотоэлектрических панелей, ведь вышеупомянутый показатель снизился с 2009 г. в 6 раз. Однако фактически в случае с Дальним Востоком данная оценка не в полной мере справедлива, ведь расчет производится относительно новых станций. Продолжение эксплуатации существующих ТЭС на данный момент более рентабельно, что в том числе обуславливает медленные темпы развития ВИЭ. Кроме того, значительную часть стоимости занимает подготовка соответствующей инфраструктуры, к примеру ЛЭП (как было ранее отмечено, достаточно дорогостоящую), ведь использование существующей сети не всегда возможно, так как ВИЭ имеют свою географическую локализацию, не всегда совпадающую с расположением функционирующих ТЭС. В том числе по этой причине, как отмечалось в исследовании Т.А. Мирошниченко [Мирошниченко, 2014], наибольшей перспективой обладает локальное использование PV-панелей для устранения точечного энергодефицита. Однако, учитывая высокий износ ряда ТЭС Дальнего Востока, не лишено смысла при принятии решения о строительстве новых электростанций выделить определенную долю, пусть и небольшую, на СЭС. Учитывая дороговизну CSP-станций, с позиции экономической выгоды приоритет стоит отдавать именно PV-панелям. Кроме того, рельеф ряда регионов ДФО РФ не позволяет целиком использовать потенциал CSP-технологий. Серьезным подспорьем в достижении рентабельности соответствующих станций может стать их размещение рядом с существующей инфраструктурой по передаче электроэнергии. По этой же причине

приведенный ранее критерий оценки «расстояние до ЛЭП» носит важный характер, что подтверждается и его высоким весом относительно других экономико-географических критериев.

Если рассуждать о вопросе развития солнечной энергетики в регионе с позиции возможного использования полученной электроэнергии для производства «зеленого» водорода, то можно отметить, что идея использования солнечных систем концентрирующего типа, как и фотоэлектрических панелей в качестве единственного источника электроэнергии в исследуемом регионе спорна. Главным фактором для подобного умозаключения является то, что значения суммарной и прямой солнечной радиации практически на всей территории исследования не столь высоки.

Если рассматривать возможность производства «зеленого» водорода только за счет электроэнергии, полученной на СЭС, то выделяются именно южные территории Амурской области, Еврейской АО и Приморского края. В то же время вопрос, насколько при таких значениях возможно экономически эффективное производство «зеленого» водорода с учетом существующих технологий, является дискуссионным. Однако возможна реализация сценария использования станций комбинированного типа СЭС-ВЭС.

ВЫВОДЫ

В связи с активным развитием возобновляемой энергетики во многих странах и регионах мира, а также наметившимся энергопереходом, вопросы, касающиеся оценки потенциала территории являются актуальными, что подтверждается большим количеством исследований на данную тему. При этом в РФ подобные исследования должны вызывать наибольший интерес, так как на текущий момент данная отрасль энергетики страны только входит в стадию активного развития. Дальний Восток может стать одним из ведущих регионов в данном процессе, что в том числе подтверждается и планами Правительства РФ.

В связи с этим была проведена оценка потенциала территории пяти субъектов Федерации, входящих в состав ДФО РФ, к развитию в них солнечной энергетики с использованием двух типов СЭС. В основу расчетов лег метод анализа иерархий с использованием комплекса нечеткой и булевой логики. Отобраны ключевые критерии, подобраны

наиболее подходящие функции и параметры для преобразования значений абсолютных данных, внесены поправки относительно территорий, где подобная хозяйственная деятельность нежелательна. Примененный в данном исследовании метод в той или иной форме встречается во многих работах на подобную тематику. Географическая основа, выраженная в использовании подходов к пространственному анализу, позволяет более комплексно подойти к вопросу и учесть большее количество факторов. В результате было получено два массива данных, на основе которых был произведен статистический анализ для выявления АТЕ, где имеются более благоприятные условия для размещения СЭС.

Помимо оценки собственно потенциала территории проведен расчет площади, пригодной для внедрения соответствующих технологий. Важно отметить, что площадные показатели не столь важны как наличие потенциала в целом. Однако более высокие значения площади придают вариативность в точной локализации предприятия, что, в свою очередь, может сказаться на развитии отрасли в целом. Безусловно, в дальнейшем необходимы расчеты технического потенциала территорий с конкретными значениями потенциальной выработки, а также анализ экономических последствий, выраженный в том числе в подсчете нормированной стоимости производства электроэнергии (LCOE). Однако в связи с достаточно быстрым развитием соответствующих технологий, а также техническими характеристиками фотоэлектрических модулей данные исследования несут в себе более технический характер и в меньшей степени основываются на сугубо географических детерминантах.

В результате проведенного исследования можно утверждать, что для размещения фотоэлектрических СЭС наиболее подходящими территориями являются юг Приморского края и некоторые южные АТЕ Амурской области и Еврейской АО. По показателям потенциала территории к размещению СЭС типа CSP лидирует Амурская область. Развитие данной отрасли, как и любой другой подпадающей под понятие «возобновляемая энергетика», требует дополнительных инвестиций на всех уровнях от планирования до реализации и хочется верить, что в случае с Дальним Востоком подобное развитие будет активным, так как оно закладывает основы энергетической безопасности страны в будущем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аббасов П.А., Гричковская Н.В. Расчет суммарной радиации на юге Дальнего Востока для энергосберегающего строительства // Academia. Архитектура и строительство. 2009. № 5. С. 419–422.

Горбунова Т.Ю. Оценка ландшафтного потенциала Юго-Восточного Крыма для использования систем возобновляемой энергетики – солнечной и ветровой: дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.36. Юж. Фед. ун-т. Симферополь, 2019. 224 с.

- Демидионов М.Ю. Пространственное моделирование потенциала развития альтернативной энергетики на примере острова Сахалин // Тихоокеанская география. 2023. № 4(16). С. 82–92.
- Иванова И.Ю., Тузузова Т.Ф., Шакиров В.А. и др. К вопросу о необходимости учета различных факторов при обосновании использования гелиопотенциала для целей электроснабжения на примере Республики Саха (Якутии) // Известия РАН. Энергетика. 2018. № 2(1). С. 41–54.
- Носкова Е.В. Природный гелиоэнергетический потенциал Забайкальского края // Географический вестник. 2017. № 4(43). С. 105–112.
- Санеев Б.Г., Соколов А.Д., Иванова И.Ю. и др. Энергетика восточных регионов России: региональные особенности и декарбонизация // Регион: экономика и социология. 2023. № 4. С. 271–298.
- Соколов А.А. Гидрография СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1952. 287 с.
- Солиман Х., Бурлов В.Г., Украинцева Д.А. Использование нечеткой логики в среде ГИС для выбора местоположения ветряных электростанций на примере провинции Хомс, Сирия // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 11(125). С. 1–13.
- Aghaloo K., Ali T., Chiu Y.-R. et al. Optimal site selection for the solar-wind hybrid renewable energy systems in Bangladesh using an integrated GIS-based BWM-fuzzy logic method, *Energy Conversion and Management*, 2023, vol. 283, no. 116899, DOI: 10.1016/j.enconman.2023.116899.
- Al Garni H.Z., Awasthi A. Solar PV power plant site selection using a GIS-AHP based approach with application in Saudi Arabia, *Applied Energy*, 2017, vol. 205, p. 1225–1240, DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.10.024.
- Amrani S., Merrouni A.A., Touili S. et al. An AHP-GIS combination for site suitability analysis of hydrogen production units from CSP & PV solar power plants in Morocco, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, vol. 56, p. 369–382, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.12.165.
- Barzehkar M., Parnell K.E., Dinan N.M. et al. Decision support tools for wind and solar farm site selection in Isfahan Province, Iran, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 23, p. 1179–1195, DOI: 10.1007/s10098-020-01978-w.
- Hooshangi N., Gharakhanlou N.M., Razin S.R.G. Evaluation of potential sites in Iran to localize solar farms using a GIS-based Fermatean Fuzzy TOPSIS, *Journal of Cleaner Production*, 2023, vol. 215, no. 135481, DOI: 10.1016/j.renene.2023.118944.
- Huld T., Amillo A.M.G. Estimating PV Module Performance over Large Geographical Regions: The Role of Irradiance, Air Temperature, Wind Speed and Solar Spectrum, *Energies*, 2015, vol. 8(6), p. 5159–5181, DOI: 10.3390/en8065159.
- Islam M.R., Aziz M.T., Alauddin M. et al. Site suitability assessment for solar power plants in Bangladesh: A GIS-based analytical hierarchy process (AHP) and multi-criteria decision analysis (MCDA) approach, *Renewable Energy*, 2024, vol. 220, no. 119595, DOI: 10.1016/j.renene.2023.119595.
- Lazarev N.I., Kuznetsov N.M. Solar energy for power supply of remote consumers in Murmansk Region, *Journal of Advanced Research in Technical Science*, 2024, no. 40, p. 55–58, DOI: 10.26160/2474-5901-2024-40-55-58.
- Rios R., Duarte S. Selection of ideal sites for the development of large-scale solar photovoltaic projects through Analytical Hierarchical Process – Geographic information systems (AHP-GIS) in Peru, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, vol. 149, no. 111310, DOI: 10.1016/j.rser.2021.111310.
- Ruiz H.S., Sunarso A., Ibrahim-Bathis K. et al. GIS-AHP Multi Criteria Decision Analysis for the optimal location of solar energy plants at Indonesia, *Energy Reports*, 2020, vol. 6, p. 3249–3263, DOI: 10.1016/j.egyr.2020.11.198.
- Vilanova A., Kim B.-Y., Kim C.K. et al. Linear-Gompertz Model-Based Regression of Photovoltaic Power Generation by Satellite Imagery-Based Solar Irradiance, *Energies*, 2020, vol. 13(4), no. 781, DOI: 10.3390/en13040781.
- Yang Y., Xia S., Huang P. et al. Energy transition: Connotations, mechanisms and effects, *Energy Strategy Reviews*, 2024, vol. 52, no. 101320, DOI: 10.1016/j.esr.2024.101320.
- Zoghi M., Ehsani A.H., Sadat M. et al. Optimization solar site selection by fuzzy logic model and weighted linear combination method in arid and semi-arid region: A case study Isfahan, IRAN, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 68(2), p. 986–996, DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.014.
- Электронные ресурсы**
- АПБЭ. URL: <https://rreda.ru/products/yearly-reviews/review-2632> (дата обращения 16.12.2024).
- Большов А. Сергей Цивилев: цель по переориентации поставок энергоресурсов РФ на Восток достигнута // ТАСС. URL: <https://tass.ru/interviews/21798711> (дата обращения 21.09.2024).
- Гидрометцентр России. URL: <https://meteoinfo.ru> (дата обращения 20.12.2023).
- ГИС ВИЭ. URL: <https://gisre.ru/> (дата обращения 25.09.2024).
- Доктрина энергетической безопасности Российской Федерации от 13.05.2019 № 216. URL: http://www.scrf.gov.ru/security/economic/energy_doc/ (дата обращения 23.11.2023).
- Корочкина А. Поставки электроэнергии из России в Китай упали до рекордно низких уровней // Forbes. URL: <https://www.forbes.ru/biznes/517891-postavki-elektroenergii-iz-rossii-v-kitaj-upali-do-rekordno-nizkih-urovnej> (дата обращения 20.11.2024).
- Мирошниченко Т.А. Возможности использования потенциала солнечной радиации на территории Амурской области // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. 2014. № 65. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozmozhnosti-ispolzovaniya-potentsiala-solnechnoy-radiatsii-na-territorii-amurskoy-oblasti/viewer> (дата обращения 01.12.2023).
- Распоряжение Правительства РФ: Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации от 05.08.2021 №136-ФЗ. URL: <http://static.government.ru/media/files/5JFns1CDAKqYKzZ0mnRADAw2NqcVsex1.pdf> (дата обращения 01.12.2023).
- Строительное оборудование. URL: https://www.stroi-oborudovanie.ru/goods/46107026-transformator_tdt_n_16000_100000_110_35_6_na_sklade (дата обращения 16.12.2024).
- Суслов К., Дорошин А., Кабанов В. и др. Анализ развития солнечной энергетики в России // Энергетическая политика. 2023. № 7(185). С. 26–45. URL: <https://energypolicy.ru/wp-content/uploads/2023/07/ep-%E2%84%967185-2023.pdf> (дата обращения 01.12.2023).

Global Solar Atlas, URL: <https://globalsolaratlas.info/> (дата обращения 01.11.2023).
 NextGIS, URL: <https://nextgis.ru/> (дата обращения 01.11.2023).
 Lazard, URL: <https://www.lazard.com/research-insights/levelized-cost-of-energyplus/> (дата обращения 21.11.2024).

Поступила в редакцию 24.06.2024

После доработки 16.11.2024

Принята к публикации 21.01.2025

ASSESSMENT OF THE SOLAR ENERGY POTENTIAL IN BORDER REGIONS OF THE FAR EASTERN FEDERAL DISTRICT

M.Yu. Demidionov

Herzen State Pedagogical University of Russia, Faculty of Geography, Laboratory for Nature Management, Engineer, Ph.D. in Geography; e-mail: demidionovforwork@gmail.com

Renewable energy is a significant topic of the contemporary discourse. Despite the numerous challenges, there has been an increase in the share and the overall electricity generation from renewable sources in numerous countries and regions worldwide. The Russian Federation does not currently have strong performance in this energy sector, particularly in terms of wind and solar power generation. However, renewable energy could play a significant role in achieving the energy security in Russia. The Far East of Russia faces a particularly pressing issue in terms of energy supply. There are growing concerns about the energy deficit in the region, which could cause problems with domestic consumption and impact the export component. Also, the Far East accounts for over 60% of the total emissions of pollutants from thermal power plants in the country. The issue of renewable energy development has been regularly raised within the energy security framework, for instance, plans to utilize renewable energy for the future production of “green” hydrogen. These plans are reflected in the “Concept for the Development of Hydrogen Energy in the Russian Federation”, which in turn states the creation of at least three clusters for “green” hydrogen production, an Eastern one among them. Given the current geopolitical landscape, as well as the gradual reorientation of Russia’s trade towards the countries in the Asia-Pacific Region, it is the Eastern Cluster that could play a crucial role in ensuring the future energy security of the country. The paper aims to evaluate the potential of the territories within the Far Eastern Federal District of the Russian Federation for solar energy development, by identifying possible locations for implementing the appropriate technological solutions. The study utilizes a method of Analytic Hierarchy Process (AHP), combined with the application of Fuzzy and Boolean logic techniques. Relevant evaluation criteria were identified, and a pairwise comparison matrix was constructed. The absolute spatial values for the criteria were converted into relative values using fuzzy logic tools. Certain restrictive factors were also taken into consideration. A statistical analysis was conducted to identify administrative-territorial units with the highest scores based on the applied methodology. An assessment was made of the area suitable for implementing the relevant technologies.

Keywords: solar energy, method of hierarchy analysis, spatial modeling

REFERENCES

- Abbasov P.A., Grichkovskaya N.V. Raschet summarnoj radiacii na yuge Dal’nego Vostoka dlya energosberegayushchego stroitel’sstva [Calculation of total radiation in the southern Far East for the energy-saving construction], *Academia. Arhitektura i stroitel’sтво*, 2009, no. 5, p. 419–422. (In Russian).
- Aghaloo K., Ali T., Chiu Y.-R., Sharifi A. Optimal site selection for the solar-wind hybrid renewable energy systems in Bangladesh using an integrated GIS-based BWM-fuzzy logic method, *Energy Conversion and Management*, 2023, vol. 283, no. 116899, DOI 10.1016/j.enconman.2023.116899.
- Al Garni H.Z., Awasthi A. Solar PV power plant site selection using a GIS-AHP based approach with application in Saudi Arabia, *Applied Energy*, 2017, vol. 205, p. 1225–1240, DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.10.024.
- Amrani S., Merrouni A.A., Touili S., Ouali H.A.L., et al. An AHP-GIS combination for site suitability analysis of hydrogen production units from CSP & PV solar power plants in Morocco, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, vol. 56, p. 369–382, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.12.165.
- Barzehkar M., Parnell K.E., Dinan N.M., Brodie G. Decision support tools for wind and solar farm site selection in Isfahan Province, Iran, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 23, p. 1179–1195, DOI 10.1007/s10098-020-01978-w.
- Demidionov M.Ju. Prostranstvennoe modelirovanie potentsiala razvitiya al’ternativnoj energetiki na primere ostrova Sahalin [Spatial modeling of the potential for alternative energy development on the example of the Sakhalin Island], *Tihookeanskaja geografiya*, 2023, no. 4 (16), p. 82–92. (In Russian)
- Gorbunova T.Ju. Ocenka landshaftnogo potentsiala Jugo-Vostochnogo Kryma dlja ispol’zovaniya sistem vozobnovljajemoj energetiki - solnechnoj i vetrovoj [Assessment of the landscape potential of the south-eastern Crimea for the application of renewable energy systems, solar and wind]: dis. ... kand. geogr. nauk: 25.00.36 / Gorbunova Tat’jana Jur’evna; Juzh. Feder. Un-t. Simferopol’, 2019, 224 p. (In Russian)

- Hooshangi N., Gharakhanlou N.M., Razin S.R.G. Evaluation of potential sites in Iran to localize solar farms using a GIS-based Fermatean Fuzzy TOPSIS, *Journal of Cleaner Production*, 2023, vol. 215, no. 135481, DOI: 10.1016/j.renene.2023.118944.
- Huld T., Amillo A.M.G. Estimating PV Module Performance over Large Geographical Regions: The Role of Irradiance, Air Temperature, Wind Speed and Solar Spectrum, *Energies*, 2015, vol. 8(6), p. 5159–5181, DOI: 10.3390/en8065159.
- Islam M.R., Aziz M.T., Alauddin M., Kader Z. Site suitability assessment for solar power plants in Bangladesh: A GIS-based analytical hierarchy process (AHP) and multi-criteria decision analysis (MCDA) approach, *Renewable Energy*, 2024, vol. 220, no. 119595, DOI: 10.1016/j.renene.2023.119595.
- Ivanova I.Yu., Tuguzova T.F., Shakirov V.A., Khalgayeva N.A. K voprosu o neobходимosti ucheta razlichnykh faktorov pri obosnovanii ispol'zovaniya geliopotenciala dlja celej jelektrosnabzheniya na primere Respubliki Saha (Jakutii) [On the need to consider various factors to substantiate the use of solar potential for power supply on the example of Yakutia], *Izvestija RAN. Energetika*, 2018, no. 2(1), p. 41–54. (In Russian)
- Lazarev N.I., Kuznetsov N.M. Solar energy for power supply of remote consumers in Murmansk Region, *Journal of Advanced Research in Technical Science*, 2024, no. 40, p. 55–58, DOI: 10.26160/2474-5901-2024-40-55-58.
- Noskova E.V. Prirodnyj gelioenergeticheskij potencial Zabajkal'skogo kraja [Natural solar energy potential of Zabaikalsky Krai], *Geograficheskij vestnik*, 2017, no. 4(43), p. 105–112. (In Russian)
- Rios R., Duarte S. Selection of ideal sites for the development of large-scale solar photovoltaic projects through Analytical Hierarchical Process – Geographic information systems (AHP-GIS) in Peru, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, vol. 149, no. 111310, DOI: 10.1016/j.rser.2021.111310.
- Ruiz H.S., Sunarso A., Ibrahim-Bathis K. et al. GIS-AHP Multi Criteria Decision Analysis for the optimal location of solar energy plants at Indonesia, *Energy Reports*, 2020, vol. 6, p. 3249–3263, DOI: 10.1016/j.egyr.2020.11.198.
- Saneev B.G., Sokolov A.D., Ivanova I.Yu. et al. Energetika vostochnykh regionov Rossii: regional'nye osobennosti i dekarbonizaciya [Energy sector in Eastern Russia: regional features and decarbonization], *Region: ekonomika i sociologiya*, 2023, no. 4, p. 271–298. (In Russian)
- Sokolov A.A. *Gidrografija SSSR* [Hydrography of the USSR], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1952, 287 p. (In Russian)
- Soliman H., Burlov V.G., Ukraineva D.A. Ispol'zovanie nechetkoj logiki v srede GIS dlja vybora mestopolozheniya vetrjanykh jelektrostantsij na primere provincii Homs, Siriya [The application of fuzzy logic in a GIS environment for the selection of wind farm locations on the example of Homs province, Syria], *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal*, 2022, no. 11(125), 82, p. 1–13. (In Russian)
- Vilanova A., Kim B.-Y., Kim C.K., Kim H.-G. Linear-Gompertz Model-Based Regression of Photovoltaic Power Generation by Satellite Imagery-Based Solar Irradiance, *Energies*, 2020, vol. 13(4), no. 781, DOI: 10.3390/en13040781.
- Yang Y., Xia S., Huang P., Qian J. Energy transition: Connotations, mechanisms and effects, *Energy Strategy Reviews*, 2024, vol. 52, no. 101320, DOI: 10.1016/j.esr.2024.101320.
- Zoghi M., Ehsani A.H., Sadat M. et al. Optimization solar site selection by fuzzy logic model and weighted linear combination method in arid and semi-arid region: A case study Isfahan, IRAN, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 68(2), p. 986–996, DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.014.
- Web sources*
- Bol'shov A. Sergej Civilev: cel' po pereorientacii postavok jenergoresursov RF na Vostok dostignuta, *TASS*, URL: <https://tass.ru/interviews/21798711> (access date 21.09.2024). (In Russian)
- Doktrina energeticheskoy bezopasnosti Rossijskoj Federacii ot 13.05.2019 №216. (In Russian), URL: http://www.scrf.gov.ru/security/economic/energy_doc/ (access date 23.11.2023).
- GIS RE, URL: <https://gisre.ru/> (access date 25.09.2024).
- Hydrometeorological Centre of Russia, URL: <https://meteo-info.ru> (access date 20.12.2023).
- IRENA, URL: <https://www.irena.org/Data> (access date 20.04.2024).
- Korochkina A. Postavki elektroenergii iz Rossii v Kitaj upali do rekordno nizkih urovnej [Elektronnyj resurs], *Forbes*, URL: <https://www.forbes.ru/biznes/517891-postavki-elektroenergii-iz-rossii-v-kitaj-upali-do-rekordno-nizkih-urovnej> (access date 20.11.2024).
- Lazard, URL: <https://www.lazard.com/research-insights/levelized-cost-of-energyplus/> (access date 21.11.2024).
- Miroshnichenko T.A. Vozmozhnosti ispolzovaniya potentsiala solnechnoy radiatsii na territorii Amurskoy oblasti [Possible use of solar radiation potential in the Amur region], *Vestnik Amurskogo gos. Un-ta, Seriya: Estestvennye i ekonomicheskie nauki*, 2014, no. 65, p. 197–204, URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozmozhnosti-ispolzovaniya-potentsiala-solnechnoy-radiatsii-na-territorii-amurskoy-oblasti/viewer> (access date 01.12.2023). (In Russian)
- NextGIS, URL: <https://nextgis.ru/> (access date 01.11.2023).
- Rasporjazhenie Pravitel'stva RF: koncepcija razvitiya vodorodnoj jenergetiki v Rossijskoj Federacii ot 05.08.2021 no. 136-FZ, URL: <http://static.government.ru/media/file/s/5JFns1CDAKqYKzZ0mnRADAw2NqcVsexl.pdf> (access date 01.12.2023). (In Russian)
- RREDA, URL: <https://rreda.ru/products/yearly-reviews/review-2632> (access date 16.12.2024).
- Stroitel'noe oborudovanie, URL: https://www.stroi-oborudovanie.ru/goods/46107026-transformator_tdt_n_16000_100000_110_35_6_na_sklade (access date 16.12.2024).
- Suslov K., Doroshin A., Kabanov V., Pereverzev D. Analiz razvitiya solnechnoj energetiki v Rossii [Analysis of the development of solar energy in Russia], *Energeticheskaja politika*, 2023, no. 7(185), p. 26–45, URL: <https://energypolicy.ru/wp-content/uploads/2023/07/ep-%E2%84%967185-2023.pdf> (access date 01.12.2023). (In Russian)

Received 24.06.2024

Revised 16.11.2024

Accepted 21.01.2025